

УДК 004.415.2

О. М. Огородникова, канд. физ.-матем. наук (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

e-mail: o.m.ogorodnikova@bk.ru

Исследовательская роль программ САЕ в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM

Введение

Все этапы изготовления и обслуживания машиностроительной продукции, включая проектирование, разработку технологий, оформление конструкторско-технологической документации, создание прототипов, проведение тестовых испытаний, производство, складирование, отгрузку, утилизацию и другие необходимые мероприятия, образуют жизненный цикл изделия. В настоящее время происходит объединение управляющих и производственных функций для эффективной организации всех этапов жизненного цикла на базе информационных технологий и систем автоматизированного проектирования (Product Life-Cycle Management, PLM) [1]. Современная концепция проектирования и подготовки производства предполагает выполнение проектных и технологических работ в едином информационно-программном пространстве, что позволяет вести одновременную разработку изделия группой специалистов, территориально расположенных в разных подразделениях, компаниях и даже странах [2].

Инновационное развитие многофункциональных компьютерных систем [3], согласованно выполняющих объемное конструирование (Computer-Aided Design, CAD), инженерные расчеты (Computer-Aided Engineering, CAE), подготовку производственно-технологических процессов (Computer-Aided Manufacturing, CAM) и управление инженерным проектом (Product Data Management, PDM), предопределяет появление новых возможностей для изготовления уникальных изделий в сжатые сроки и с минимальными затратами.

Доступность мощных компьютеров, высокая скорость передачи данных по сети и широкое распространение программного обеспечения для проектирования и подготовки производства в машиностроении привели к тому, что в настоящее время и крупные промышленные предприятия, и небольшие инжиниринговые компании внедряют компьютерные системы для эффективного решения производственных и управленческих задач. Потребность конструкторских бюро, научно-исследовательских организаций и промышленности в быстрых, надежных и удобных для пользователя программах, реализующих широкий спектр инженерных расчетов (прочностных, гидродинамических, тепловых и многих других) послужила импульсом к разработке как универсальных, так и специализированных пакетов прикладных программ для компьютерного инженерного анализа – CAE.

Наблюдаемый в последнее десятилетие стремительный темп обновления и совершенствования программ CAE разработчиками намного опережает результативность и полноту их использования рядовыми инженерами. Одной из причин дисбаланса является недостаточное понимание роли и сути этих программ, прежде всего – организаторами производственных и образовательных структур, которые недооценивают актуальность изменения подходов к подготовке специалистов, в полной мере владеющих современными технологиями компьютерного моделирования.

Цель работы

Цель данной работы – проанализировать опыт использования программ CAE в составе комплексов CAD/CAE/CAM, в том числе образовательный, исследовательский и коммерческий опыт автора статьи, и позиционировать CAE-системы как современный инструмент для выполнения вычислительных экспериментов при решении различных исследовательских и проектных задач в машиностроении.

Функции CAE в составе CAD/CAE/CAM

Классификация программ CAE. Все многообразие инженерных расчетов, представляющих интерес для машиностроения, можно классифицировать по объектам моделирования и разбить на два основных направления – конструктор-

торские расчеты и имитация технологий. По типу решаемых уравнений в механических расчетах конструкции машин можно выделить задачи кинематики, статики, динамики и устойчивости. Вместе с тем, большинство инженерных задач не ограничивается вычислением механических характеристик конструкции. Как правило, в программной среде моделируется поведение технического объекта, который подвергается одновременно воздействию нескольких нагрузок, имеющих разную физическую природу. Это могут быть тепловые, механические, гидроаэромеханические нагрузки, воздействие электрических и магнитных полей, облучение потоком заряженных частиц. Для получения корректных результатов требуется учесть их совместное влияние на объект. Соответствующие такой расширенной постановке расчетные задачи носят комплексный характер, относятся к классу междисциплинарных и успешно решаются программами CAE [4]. Моделирование технологий включает компьютерный анализ технологических процессов литья металлов [5] и пластмасс [6], обработки давлением [7], термообработки [8], сварки [9, 10], механообработки [11].

В сквозной технологии проектирования и подготовки производства CAD/CAE/CAM местоположение CAE-программ можно обозначить на двух уровнях (рис.1): «конструктор» и «технолог». На уровне «конструктор» создается объемная модель конструкции в CAD и проверяются функциональные возможности изделия в конструкторских CAE-программах, причем проектирование ведется в контексте сборки. Если в CAE выявляется несоответствие функциональных возможностей анализируемой компьютерной модели тем параметрам, которые обозначены в техническом задании на разработку изделия, то конструкция подвергается редактированию в CAD и отправляется на повторную проверку в CAE.

Когда конструкторские программы CAE подтверждают, что расчетные параметры модели соответствуют заданным требованиям, отдельные детали машины из сборки отправляются на уровень «технолог», где проектируется технологическая оснастка в CAD и оптимизируются технологии изготовления деталей с помощью технологических CAE-программ. Если проектируемая оснастка не обеспечивает изготовление бездефектной детали, она подвергается

доработке в CAD. Когда технологии оптимизированы и готовы геометрические модели оснастки, эстафета передается программам CAM, которые обеспечивают изготовление оснастки в инструментальном производстве, и на заключительной стадии – серийную обработку деталей.

Интеграция и передача данных. Проектирование в интегрированной среде CAD/CAE [12] предполагает создание исходной геометрической модели и ее первичный расчет, а затем при необходимости циклическое повторение корректировок конструкции в CAD/CAE до полного совмещения расчетных результатов с требованиями технического задания. На последнем шаге такого итерационного совершенствования в CAD-программе создается наилучший проектный вариант. Поиск необходимых параметров конструкции все чаще ведут на параметрических моделях с использованием специальных средств и модулей оптимизации [13].

В интегрированных программных средах [14] CAE-модуль читает файл геометрии во внутреннем формате CAD-системы. При необходимости геометрическую модель можно отправить на расчет в автономную CAE-систему аналитического уровня, установленную, например, на суперкомпьютере в центре коллективного пользования [15]. В этом случае передачу данных стараются произвести в наиболее устойчивом формате [16].

Исследовательская роль CAE

Компьютерное проектирование – один из наиболее важных этапов жизненного цикла изделия, который неразрывно связан с исследованием конструкции машины и оценкой ее эксплуатационных параметров средствами CAE. Вместе с тем, в программных комплексах, реализующих идеологию PLM, программы CAE занимают обособленную позицию. Тому есть несколько причин.

Во-первых, CAE-программы, особенно «тяжелого класса», требуют на порядок больше машинных ресурсов, чем системы конструирования или подготовки производства, поэтому они устанавливаются на выделенные расчетные станции и обслуживаются, как правило, математиками-расчетчиками. Отличительной особенностью CAE-программ является большой объем одновременно обрабатываемых данных. Современные вычислители CAE в зависимости от

масштаба решаемой задачи осуществляют параллельные вычисления с использованием различных методов и структур: распределенные вычисления в сети Internet [17], GRID-офис [18], кластеры и суперкомпьютеры [19].

Во-вторых, в процессе проектирования и изготовления машиностроительных изделий САЕ-программы располагаются за пределами магистрального движения цифровой 3D-модели, сами не вносят транслируемых изменений в геометрию и являются по сути средством проверки функциональной пригодности конструкции или оптимизации технологических параметров изготовления деталей.

В-третьих, как это ни парадоксально, но инженерный анализ конструкции является для конструктора в определенной степени чужим полем; поскольку целью САЕ является не синтез новой конструкции, а так же, как в научном исследовании, – получение новых знаний, в данном случае о свойствах проектируемого изделия. Компьютерный инженерный анализ по смыслу аналогичен научному исследованию. Его методология радикально отличается от основных принципов конструирования, и в плане постановки задачи, и в плане методов решения, и в плане интерпретации результатов.

Компьютерный инженерный анализ фактически является вычислительным экспериментом, а программы САЕ выполняют при этом роль исследовательского инструмента. В российских источниках для обозначения виртуальных исследований с помощью компьютерных программ используются также термины «вычислительное моделирование» и «компьютерная симуляция».

Решение прикладных задач средствами САЕ

Компьютерные инструменты САЕ используются преимущественно в прикладных исследованиях, направленных на поиск новых технических решений, конструкций и технологий. Далее приводится краткое резюме некоторых типичных задач, решенных российскими исследователями за последний календарный год, с указанием использованных программ САЕ и со ссылкой на соответствующие литературные источники.

Запас прочности, APM WinMachine [20]. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) металлургического оборудования под

действием сосредоточенных и распределенных силовых нагрузок с учетом собственного веса деталей позволяет снизить металлоемкость машины, одновременно повысив запас прочности и работоспособность основных узлов установки. Решение в данной российской программе получено на стержневой модели.

Статическая прочность, Autodesk Inventor [21]. Исследование НДС отдельных деталей и узлов в статическом анализе позволяет обоснованно вносить изменения в геометрию деталей при заданной схеме нагружения и совершенствовать прочностные характеристики.

Жесткость, Altair + ANSYS/LS-Dyna [22]. Исследование жесткости каркаса гоночного автомобиля под действием кинематических нагрузок позволяет проектировать детали, удовлетворяющие регламенту международных соревнований, условиям безопасной эксплуатации и требованиям технологичности. Техническое содержание проекта защищено патентами.

Усталостная прочность, CosmosWorks [23]. Оценка НДС деталей вагонов по максимальной нагрузке стационарного цикла в условиях статического нагружения и использование оригинального метода расчетов на конечно-элементной сетке позволяет прогнозировать количество циклов до появления усталостной трещины или до разрушения детали.

Ударное воздействие, Pro/Engineer Mechanical [24]. Исследование поведения бортового прибора при ударном нагружении однократными импульсными ускорениями в виде полусинусоид, заключается в анализе отклика с учетом собственных колебаний конструкции и позволяет корректировать 3D-модель, повышая ее надежность.

Пластическая деформация в контактной зоне, ANSYS/LS-Dyna [11]. Исследование контактного взаимодействия шероховатой поверхности с режущим инструментом в процессе механической обработки позволяет выявить основные закономерности получения сложнопрофильных поверхностей высокого качества при чистовой обработке и разработать необходимые для этого методы настройки станков с ЧПУ.

Несущая способность, **MSC.Nastran** [25]. Компьютерный расчет несущей способности рабочих колес реактивных турбин под действием комплекса нагрузок, включая центробежные силы, перепад давлений и температурное воздействие, с нелинейной моделью материала и с учетом зависимости свойств материала от температуры позволяет точнее оценивать запас прочности турбины и выбирать пути ее форсирования.

В большинстве случаев российские ученые для выполнения прикладных исследований выбирают программный комплекс **ANSYS**: контактные напряжения в резьбовом соединении [26], тепловые деформации и напряжения в волновом твердотельном датчике [27] и другие задачи.

Решение теоретических задач

и выполнение уникальных вычислительных экспериментов в CAE

Компьютерные инструменты CAE используются не только в прикладных исследованиях, но и в сугубо научных целях – для поиска новых закономерностей, например, при разработке новых материалов и нанотехнологий. Так, в работе [28] модальный анализ средствами **ANSYS** используется только для оценки оригинального подхода к неразрушающему методу обнаружения трещин в матрице слоистых композитов, а в работе [29] модальный анализ двухслойной спиральной нанопленки, обладающей пьезоэлектрическими свойствами, проводится средствами **ABAQUS** и позволяет прогнозировать поведение наноструктуры при совмещении различных свойств.

Многие задачи, с которыми приходится в настоящее время сталкиваться инженерам, не поддаются точному аналитическому решению либо требуют огромных затрат на экспериментальную реализацию выбора правильного варианта конструкции. К таким задачам относятся проектные задачи нано- и микроэлектроники [30] в связи с высокой стоимостью и трудоемкостью изготовления опытных образцов.

Существует обширный класс задач, например, в области медицинской техники и протезирования, где натурное испытание прототипов представляется неэтичным. В связи с этим крайне актуальным направлением развития программ CAE становится конечно-элементное моделирование биологических тка-

ней [31] в задачах хирургии и травматологии. Свою специфику имеет компьютерное проектирование механизмов для замещения биологических объектов. Современные технологии особенно важны в медицине [32], например, при изготовлении протезов по индивидуальному заказу, когда используется цифровая модель. Реверсивный инжиниринг, компьютерное моделирование и быстрое прототипирование обеспечивают качественный и быстрый результат в единичном производстве протезов с учетом анатомических особенностей и индивидуальной биомеханики. В таких случаях единственным методом, позволяющим быстро оценить эффективность предлагаемого технического решения, становится компьютерное моделирование.

Корректировка компьютерных расчетов. Компьютерные расчеты с целью обеспечения их достоверности дополняются экспериментальными данными. Дополнив численный эксперимент натурными испытаниями на последних стадиях проектирования, можно достичь максимального соответствия полученных результатов реальному поведению конструкции. В вычислительном моделировании различают верификацию и валидацию расчетных моделей [33]. **Верификация** проводится на начальном этапе и предполагает решение простой очевидной задачи с обязательным совмещением расчетных результатов с экспериментальными данными. **Валидация** проводится для сложных расчетных моделей с целью уточнения отдельных параметров, характеризующих уникальное взаимодействие различных частей конкретной модели, и осуществляется также с использованием экспериментальных методик. Технология сочетания компьютерного моделирования проектируемого изделия с экспериментальным подтверждением адекватности принятых конструкторских решений и расчетных моделей при сокращенном объеме экспериментальных исследований обеспечивает оптимальный баланс между точностью и стоимостью проекта. В дальнейшем, при проектировании аналогичных конструкций и устройств, проведение экспериментов на натурных образцах не требуется, достаточно получить подтверждение технических характеристик на верифицированных компьютерных моделях.

Использование CAD/CAE/CAM в учебно-исследовательской работе студентов

В УрФУ сквозные технологии CAD/CAE/CAM изучаются студентами и применяются для выполнения учебно-исследовательских работ. Одним из потребителей технологий CAD/CAE/CAM является инструментальное производство, обслуживающее изготовление литых заготовок деталей машин. Поддерживается две линии программных продуктов CAD/CAE/CAM на уровне технологий: зарубежная (Siemens PLM Software – WinCast) и российская (ADEM – LVMFlow).

Программная среда Siemens PLM Software (CAD/CAM) – WinCast (CAE) важна для обучения иностранных студентов на английском языке. В данной статье представлена работа студента Робина Картхауза (Technische Fachhochschule, Sudwestfalen, Deutchland – University of Applied Sciences), изучавшего на кафедре электронного машиностроения УрФУ в течение семестра технологии CAD/CAE/CAM. Технический университет в Германии оценил семестр, проведенный студентом в УрФУ, как полностью эквивалентный по объему полученных знаний и практических навыков семестру обучения в немецком университете. Студентом была выполнена практическая работа по заданию Уралмашзавода, которая заняла первое место в российском конкурсе «Компьютерный инжиниринг – 2008». Работа заключается в проектировании и подготовке производства литой детали из серого чугуна методом литья в песчаноглинистую форму и состоит из следующих этапов, объединенных общей цифровой моделью.

Этап 1 CAD. Создание объемной модели литой детали (рис.2) в составе сборки машины и построение на ее базе геометрической модели литой заготовки (отливки).

Этап 2 CAE. Анализ литейных особенностей геометрии отливки, выявление горячих зон по расчетным температурным полям.

Этап 3 CAD. Объемное конструирование литниково-питающей системы (рис. 3), исходя из расположения горячих зон в отливке.

Этап 4 CAE. Расчет служебных параметров литейных процессов: анализ направленности процессов кристаллизации и выявление горячих зон по эволюции температурных полей (рис.4), оценка эффективности литниково-питающей системы, прогнозирование усадочных дефектов и возможного образования трещин.

Этап 5 CAD. Конструирование стержневых ящиков на базе геометрических моделей отливки и литниково-питающей системы (рис.5).

Этап 6 CAM. Подготовка программ для изготовления модельной оснастки и стержневых ящиков на станках с ЧПУ (рис.6).

Программа CAE предоставляет богатые возможности для исследования технологических процессов литья. Компьютерная визуализация скрытых процессов заполнения расплавом формы и образования дефектов позволяет вести обоснованный и направленный поиск верных конструктивных решений. По результатам компьютерного расчета можно выявить области возникновения литейных дефектов (микропористость, горячие трещины, усадочные дефекты) в отливке и изменить литниково-питающую систему, если это необходимо. Не ограничиваясь решением типовых задач, можно проводить сложные вычислительные эксперименты, насыщая их новыми физическими моделями анализируемых процессов и материалов, например: для литых деталей, имеющих сложную геометрию, выполнить расчет остаточных технологических напряжений и коробления до термической обработки и после нее; приложить эксплуатационные нагрузки и суммировать возникшие внутренние напряжения с технологическими остаточными напряжениями; оценить фазовую и зеренную структуру детали, и как следствие, получить объемное распределение механических свойств.

Заключение

При проектировании в программной среде CAD/CAE/CAM программы CAE выполняют вычислительные эксперименты в широком спектре физических моделей и процессов, обеспечивая правильный выбор инженерами конструктивных и технологических параметров проектируемого изделия. В прикладных исследованиях компьютерные инструменты CAE используются для поиска

новых технических решений, конструкций и технологий. Вместе с тем, компьютерный инженерный анализ может быть направлен на решение теоретических задач и выявление новых закономерностей, например, при разработке нанотехнологий и новых материалов. Преимуществом компьютерного исследования является возможность анализировать междисциплинарные расчетные модели и визуализировать скрытые процессы.

К существенным недостаткам многих российских публикаций об исследованиях с использованием инструментов САЕ следует отнести отсутствие информации о том, какая программа была использована и каким образом была сформулирована расчетная модель. Отсутствие такой важной информации затрудняет экспертную оценку достоверности полученных результатов, поскольку читатели лишены возможности повторить вычислительный эксперимент. Краткое описание использованных компьютерных методов исследования обязательно должно присутствовать в методической части статьи.

Список литературы

1. Tang D. and Qian X. Product lifecycle management for automotive development focusing on supplier integration // Computers in Industry. – 2008. – V. 59, Issues 2-3. – P. 288-295.
2. Mahdjoub M., Monticolo D., Gomes S. and etc. A collaborative Design for Usability approach supported by Virtual Reality and a Multi-Agent System embedded in a PLM environment // Computer-Aided Design. – 2010. – V. 42, Issue 5. – P. 402-413.
3. Leon N. The future of computer-aided innovation // Computers in Industry. – 2009. – V. 60, Issue 8. – P. 539-550.
4. Korvink J.G., Greiner A. and Liu Z. Multiphysics and Multiscale Simulation // Comprehensive Microsystems. – 2008. – V. 1. – P. 539-557.
5. Мартыненко С.В., Огородникова О. М., Грузман В.М. Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок // Литейное производство. – 2009. – № 11. – С. 21-26.

6. Farshi B., Gheshmi S. and Miandoabchi E. Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm // *Materials & Design*. – V. 32, Issue 1. – P. 414-423.

7. Паршин С.В., Огородникова О. М. Моделирование технологических процессов в САЕ-пакете ANSYS 7 // *САПР и графика*. – 2003. – № 2. – С.58-59.

8. Warke V. S., Sisson R. D., Makhlof M. M. FEA model for predicting the response of powder metallurgy steel components to heat treatment // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – V. 518, Issue 1-2. – P. 7-15.

9. Votinova E., Ogorodnikova O. and Shalimov M. Possibilities of Software for Welding Manufacture // *The Fifth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Material Technologies*. – 2008. – Israel, Ariel University. – V.2. – P.170-179.

10. Anca A., Cardona A., Risso J and etc. Finite element modeling of welding processes // *Applied Mathematical Modelling*. – 2011. – V. 35, Issue 2. – P. 688-707.

11. Гурин П., Нестеров С., Машков А. Использование CAD/CAM-систем фирмы Delcam в исследовательской работе // *САПР и графика*. – 2010. – №4. – С.18-20.

12. Журавлев Э. Ю., Огородникова О. М. Конечно-элементный анализ наклонного вала колесопрокатного стана // *Вестник машиностроения*. – 2008. – №9. – С.3-6.

13. Егоров И.Н., Кретинин Г.В., Федечкин К.С. Оптимизация геометрических параметров осевого компрессора // *Наукоемкие технологии*. – 2008. – Т. 9, № 3. – С. 46-49.

14. Park H. S. and Dang X. P. Structural optimization based on CAD–CAE integration and metamodeling techniques // *Computer-Aided Design*. – 2010. – V. 42, Issues 10. – P. 889-902.

15. Радченко Г. И., Соколинский Л. Б. Технология построения виртуальных испытательных стендов в распределенных вычислительных средах // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного универси-*

тета информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 54. – С. 134-139.

16. Hamri O., Léon J. C., Giannini F. and etc. Software environment for CAD/CAE integration // *Advances in Engineering Software*. – 2010. – V. 41, Issues 10-11. – P. 1211-1222.

17. Yu J., Cha J., Lu Y. and etc. A CAE-integrated distributed collaborative design system for finite element analysis of complex product based on SOOA // *Advances in Engineering Software*. – 2010. – V. 41, Issue 4. – P. 590-603.

18. Weiss K. and Ogorodnikova O.M. Parallel simulation of cast processes in Win-Cast // Труды международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии ПАВТ'2008» (Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля, 2008 г.). – Челябинск, изд-во ЮУрГУ, 2008. – С.282.

19. Московский А.А., Перминов М.П., Соколинский Л.Б. и др. Опыт использования суперкомпьютера «СКИФ Аврора» для решения научно-технических задач // *CAD/CAM/CAE Observer*. – 2010. – №3. – С.71-77.

20. Кайтуков Г.Ф. Исследование прочности и металлоемкости элементов катодосдирочной машины в САПР АРМ Win Machine // *САПР и графика*. – 2010. – №3. – С.81-83.

21. Стремнев А. Прочностные анализы в Autodesk Inventor // *САПР и графика*. – 2010. – №5. – С.20-22.

22. Применение CAD/CAM/CAE-систем для проектирования и изготовления гоночного автомобиля // *САПР и графика*. – 2010. – №2. – С.71-76.

23. Миронов В.И., Якушев А.В. Прогнозирование ресурса элементов подвижного состава // *Тяжелое машиностроение*. – 2010. – №3. – С.26-29.

24. Бирбраер Р., Радченко И., Московченко А. и др. Инновационный подход к обеспечению надежности разрабатываемых изделий. Исследование динамического поведения изделия с использованием Pro/ENGINEER Mechanica // *САПР и графика*. – 2010. – №5. – С.74-79.

25. Овчинников И.В. Несущая способность рабочего колеса реактивной турбины в неравномерном температурном поле // *Полет*. – 2010. – № 4. – С.49-55.

26. Курушин М.И., Курушин А.М. Способ выравнивания усилий по виткам резьбы, повышения прочности стержня и самоторможения гайки резьбового соединения // Вестник машиностроения. – 2010. – №5. – С.77-79.
27. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели тремоупругого напряженно-деформированного состояния, температурных и технологических погрешностей волнового твердотельного датчика инерциальной информации // Проблемы машиностроения и прочности машин. – 2010. – №3. – С.55-63.
28. Ху Х., Ли Ч.-С., Ву Ч. И др. Обнаружение трещин в матрице слоистых композитов методом модальной энергии деформирования // Механика композитных материалов. – 2010. – Т.46, № 2. – С.177-198.
29. Гирченко А.А., Еремеев В.А., Морозов Н.Ф. Моделирование спиральных нанопленок с пьезоэлектрическими свойствами // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – № 2. – С. 5-10.
30. Огородникова О. М., Панин О. А. Компьютерное исследование компонентов микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – №5. – С. 12-15.
31. Vigneron L. M., Boman R. C., Ponthot J.-P. and etc. Enhanced FEM-based modeling of brain shift deformation in Image-Guided Neurosurgery // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2010. – V. 234, Issue 7. – P. 2046-2053.
32. Colombo G., Filippi S., Rizzi C. and etc. A new design paradigm for the development of custom-fit soft sockets for lower limb prostheses // Computers in Industry. – 2010. – V. 61, Issue 6. – P. 513-523.
33. Maropoulos P.G. and Ceglarek D. Design verification and validation in product lifecycle // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2010. – V. 59, Issue 2. – P. 740-759.

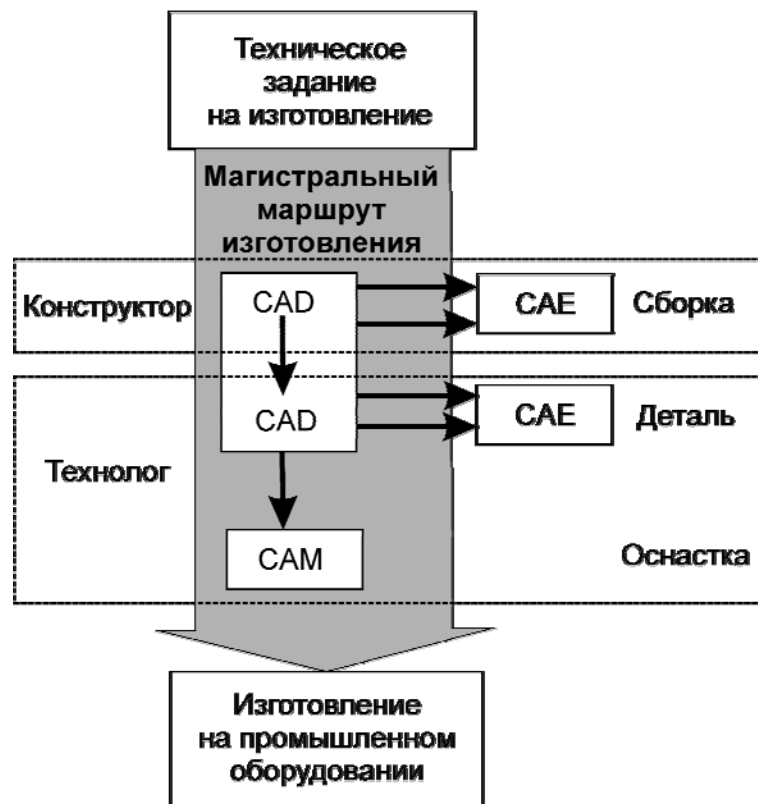


Рис.1. Схема передачи геометрии в сквозной технологии проектирования и производства CAD/CAE/CAM



Рис. 2. Геометрическая модель литой детали

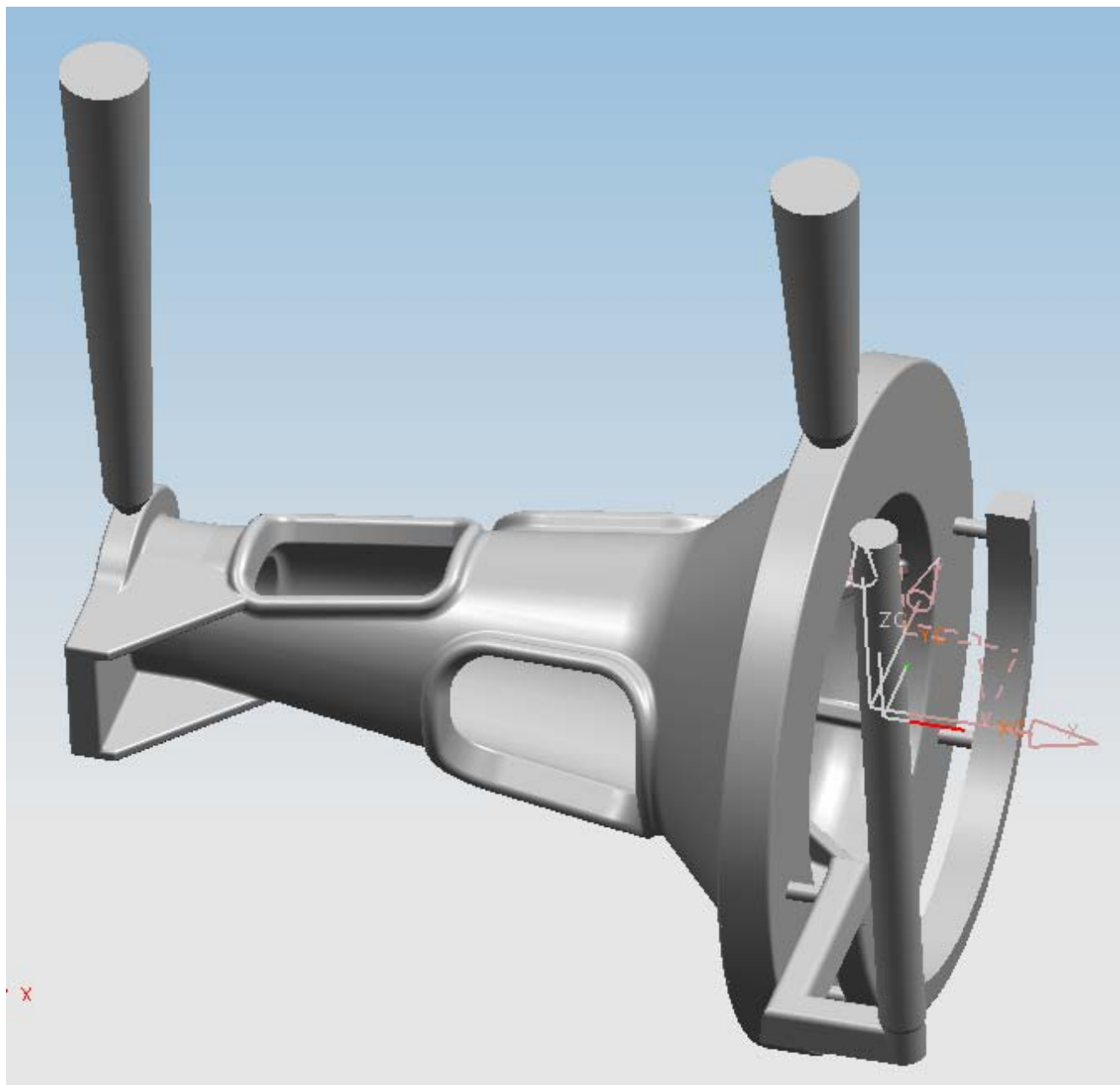


Рис.3. Геометрическая модель отливки и литниково-питающей системы

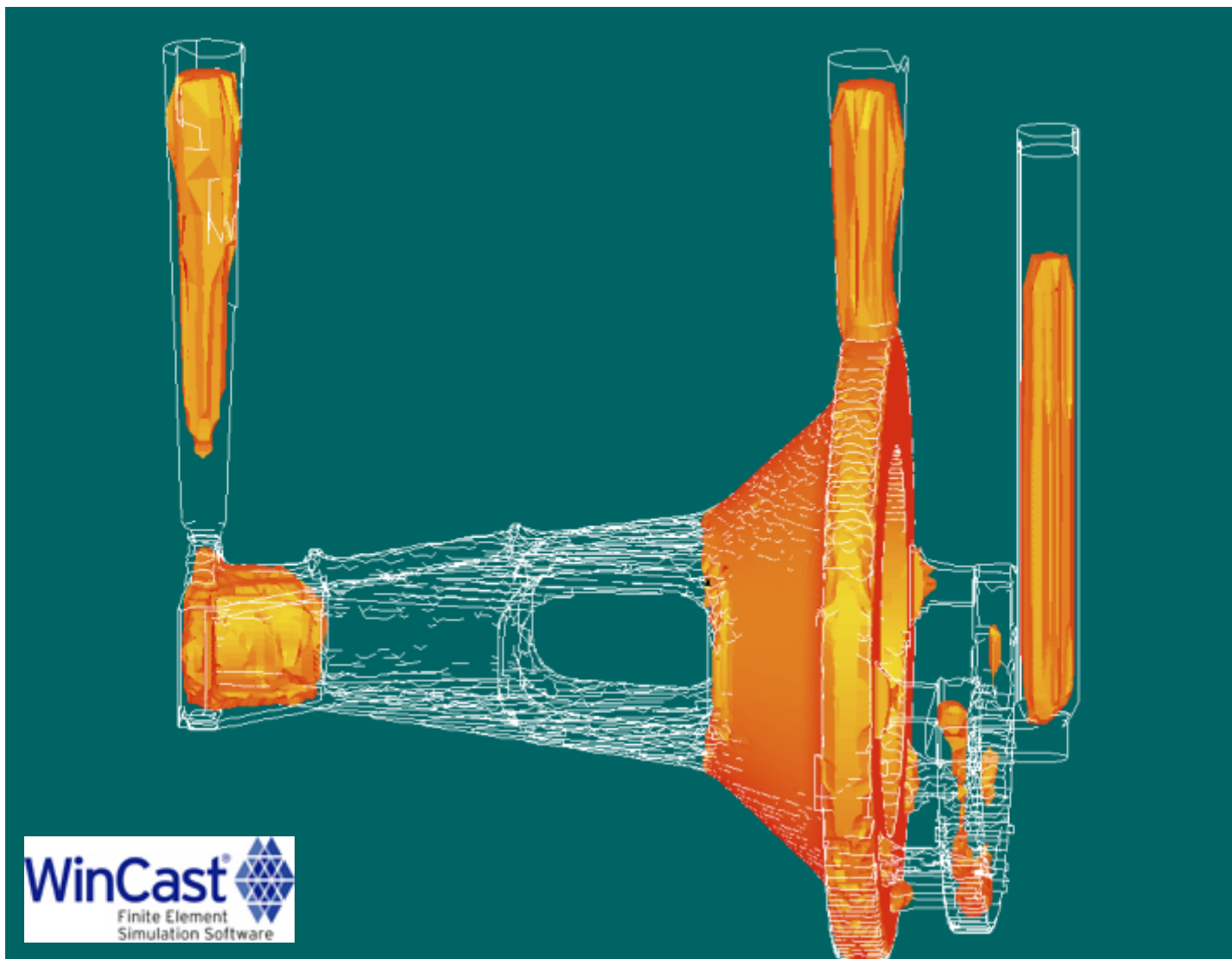


Рис.4. Моделирование процессов затвердевания металла в форме: перемещение изоповерхности солидус

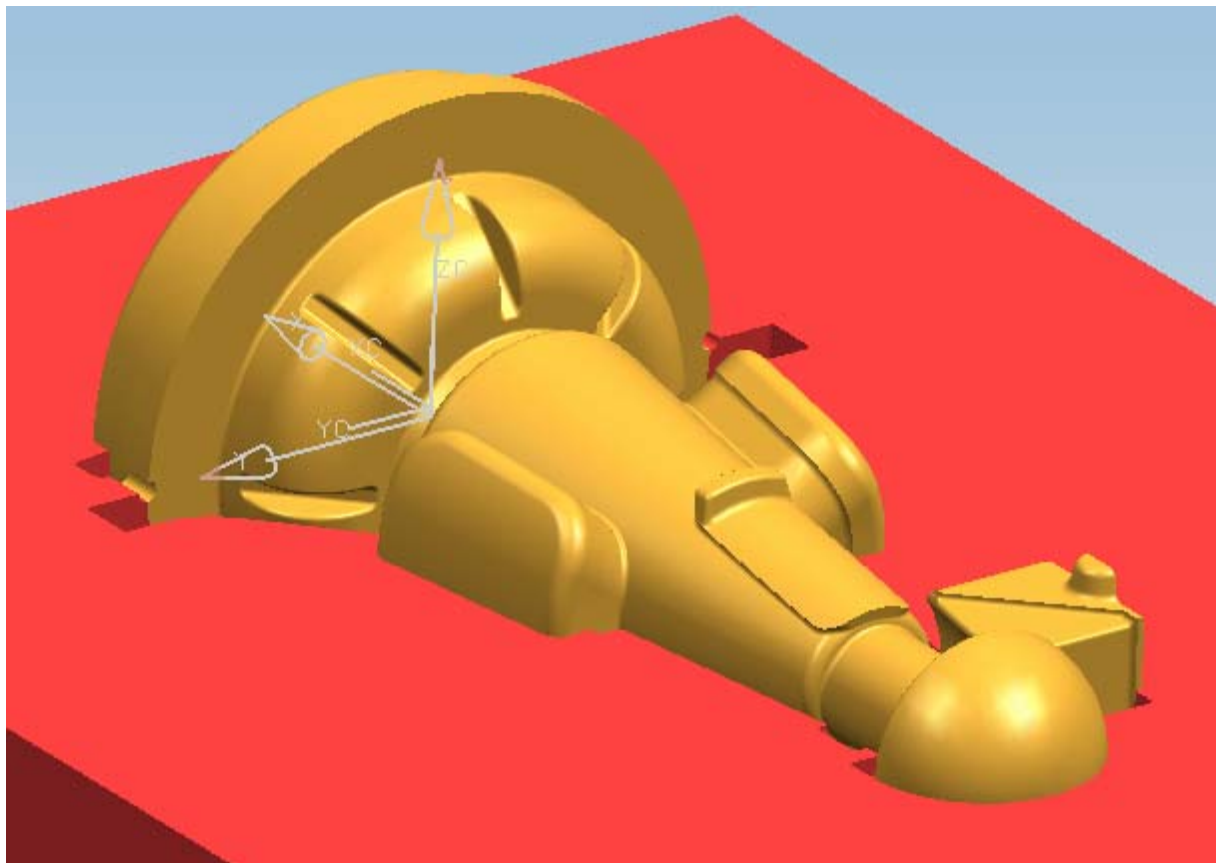


Рис.5. Объемное конструирование стержня и стержневого ящика

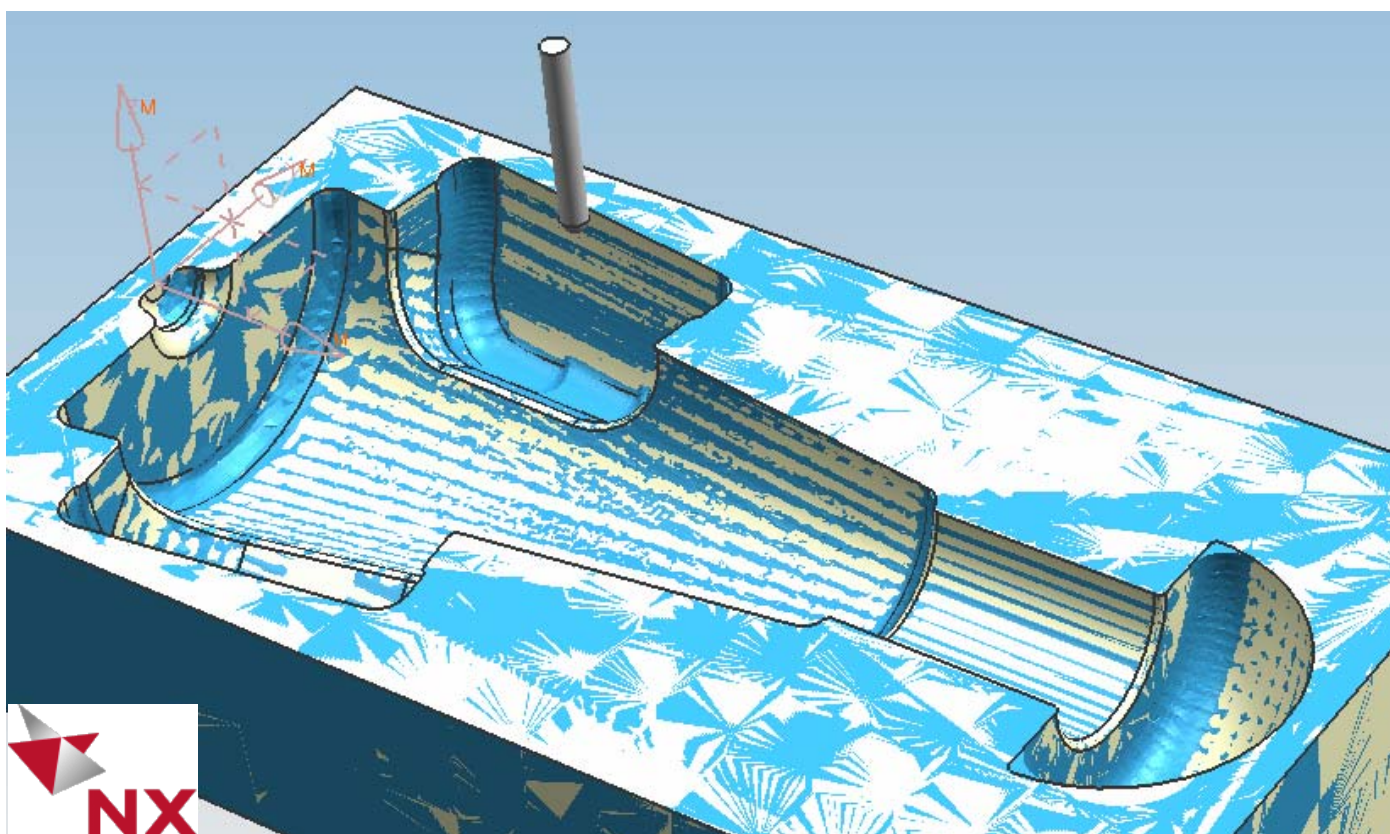


Рис.6. Изготовление стержневого ящика на станке с ЧПУ

Аннотация

В работе проанализирован опыт использования программ САЕ в составе комплексов CAD/CAE/CAM. САЕ-системы позиционированы как современный инструмент для выполнения вычислительных экспериментов при решении различных исследовательских и проектных задач в машиностроении. Приведены примеры использования компьютерных инструментов САЕ в прикладных исследованиях, направленных на поиск новых технических решений, конструкций и технологий.

Ключевые слова

CAD/CAE/CAM, компьютерный инжиниринг, компьютерное моделирование.

Scientific research application of CAE software in CAD/CAE/CAM technologies

O. M. Ogorodnikova

Abstract

The application of CAE software in CAD/CAE/CAM technologies was analysed. The CAE programs are positioned as research instrument for various investigations and simulations of machine projects. Some examples of CAE use for search of new technical solutions, structures and technologies are given.

Key words

CAD/CAE/CAM, computer-aided engineering, CAE, simulation.

Сведения об авторах

Огородникова Ольга Михайловна, канд.физ.-матем.наук, доцент кафедры «Электронное машиностроение» Уральского федерального университета, руководитель Техноцентра компьютерного инжиниринга.

Адрес: 620002 Екатеринбург, Мира 19, УрФУ, почтовый ящик 6А, аудитория ГУК100, телефон/факс +7 343 375 94 03, e-mail O.M.Ogorodnikova@bk.ru
web <http://cae.ustu.ru>